



自動運転車の安全性評価 —シナリオベースの論証体系と国際標準化—

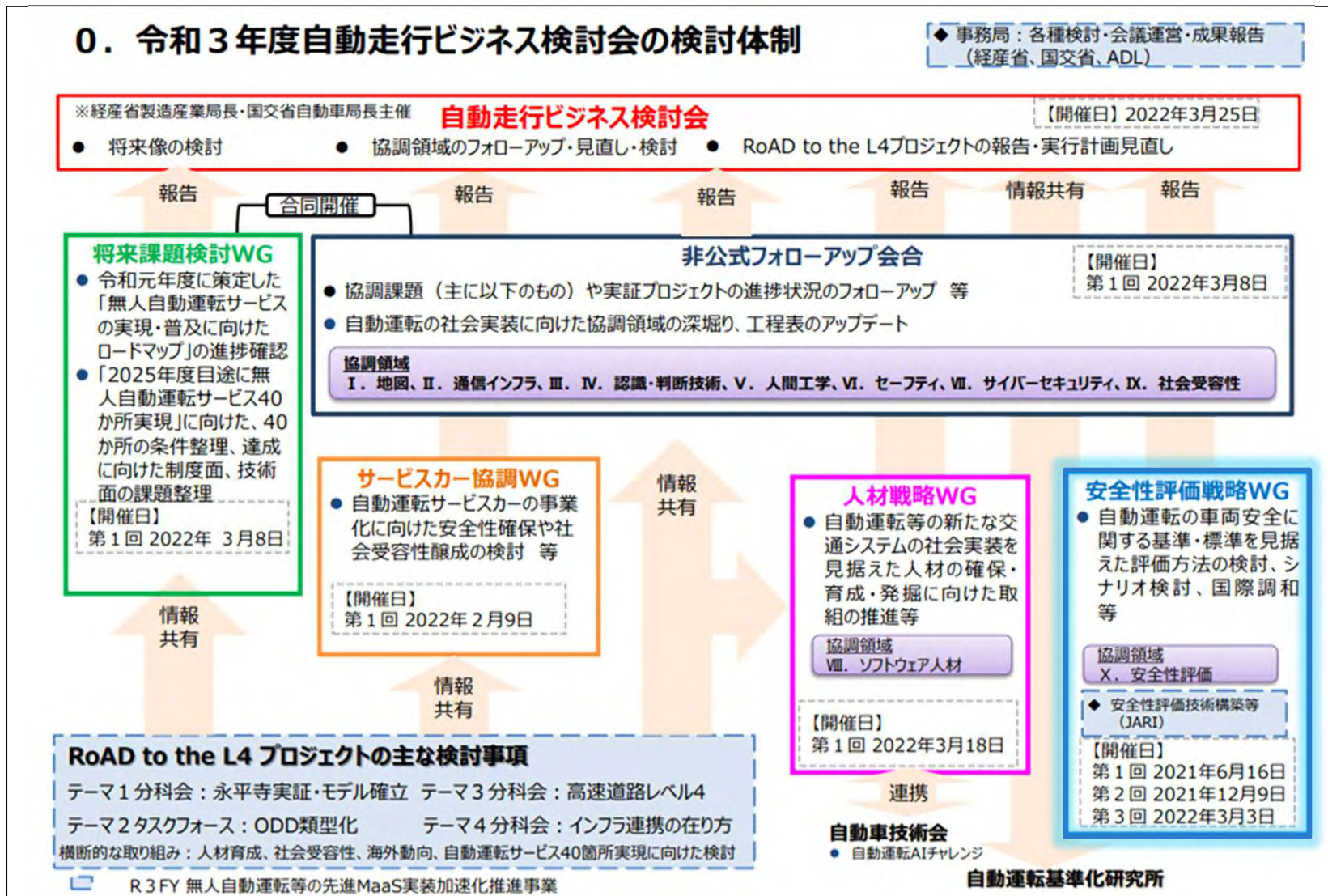
北島 創

(一財)日本自動車研究所 自動走行研究部



自動運転車の安全性評価 = 協調領域

◆ 安全性評価：国際競争力の確保・強化のための一課題



SAKURAプロジェクトについて

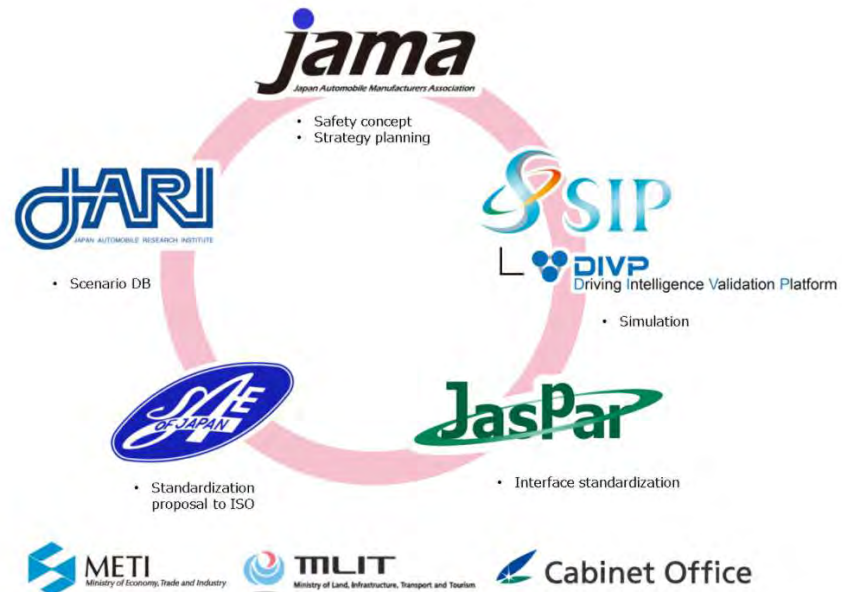
◆ 経緯

- ・自動走行ビジネス検討会の協調領域（「X.安全性評価」）に対応
- ・安全性評価戦略WG（2019年度まで安全性評価環境づくり検討WG/戦略SWG）で、2018年度から経済産業省委託事業が開始
- ・自動運転車の社会実装に必要な**安全性評価手法**の確立と共に、**国際的な制度調和**への貢献を目指した取組み

◆ パートナーシップ



※SAKURAプロジェクトWebサイトより（2022年11月現在）
<https://www.sakura-prj.go.jp/tabid76.html>



本日の内容

1. 自動運転の安全性評価の動向
2. SAKURAプロジェクト概要
3. 現在の国際標準化の動向
4. まとめと今後の取組み

1. 自動運転の安全性評価の動向

(シナリオベースの論証体系：日独の提案手法)

自動運転車の安全性をどう評価するのか？

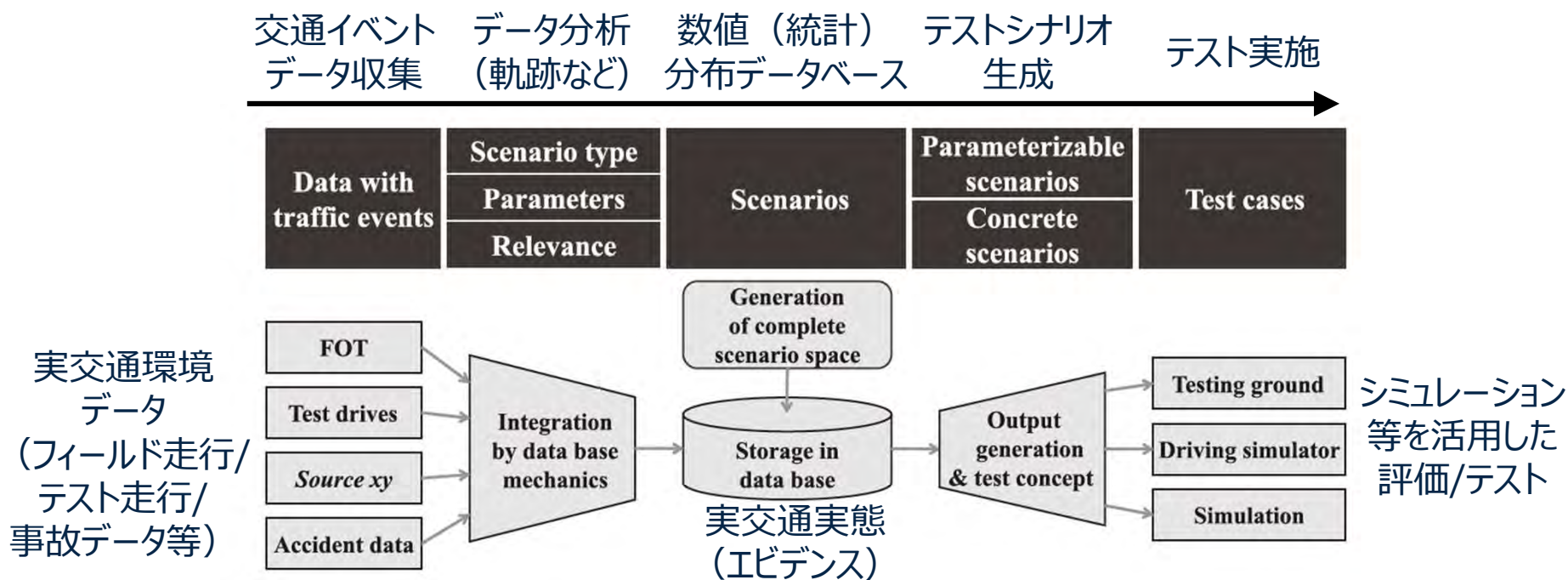
◆ 自動運転車の安全性評価の課題

【公道実車走行テストの徹底的な実施による評価】

- 誤作動やテストドライバ介入事例を収集・改善して安全性を高める
- 実車公道試験によるランダムサンプリングでは交通イベントの収集が不十分



独PEGASUSプロジェクトにおけるシナリオベースの安全性評価アプローチ



自動運転車の安全性をどう評価するのか？

◆独PEGASUSプロジェクトにおけるシナリオ定義のための6レイヤーモデル

- シミュレーション等によるシナリオベースの安全性評価
- 生成したテストシナリオが十分であることを示す必要性（網羅性の担保）



国内における安全性評価手法の取組み

◆ 3要素別の網羅的なシナリオ体系と交通外乱シナリオ



SAKURAプロジェクト検討着手 (2018年度~)

		Surrounding Traffic Participants' Position and Behavior				
		カットイン	カットアウト	加速	減速(停止)	
Road Geometry and Ego-vehicle behavior	本線	レーンキープ	No.1	No.2	No.3	No.4
		レーンチェンジ	No.5	No.6	No.7	No.8
	合流	レーンキープ	No.9	No.10	No.11	No.12
		レーンチェンジ	No.13	No.14	No.15	No.16
	分岐	レーンキープ	No.17	No.18	No.19	No.20
		レーンチェンジ	No.21	No.22	No.23	No.24

(日本自動車工業会:自動運転の安全性評価フレームワークVer2.0)

- ・シナリオ体系：認識・判断・操作の各要素で発生しうる危険を構造化
- ・交通外乱：自車の安全走行を妨げる自車周辺の交通参加者の位置と動作

自動運転車が満たすべき安全性

◆ 自動運転車の安全性に関する基本的な考え方



WP29 Revised framework document¹⁾ (2019年9月)

Under their ODD/OD, AD shall not cause any traffic accidents resulting in injury or death that are **reasonably foreseeable** and **preventable**.

(出典: UN WP29)



国土交通省

自動運転車の安全技術ガイドライン (2018年9月)

自動運転車が満たすべき車両安全の定義を、「許容不可能なリスクがないこと」、すなわち、自動運転車の運行設計領域(ODD)において、自動運転システムが引き起こす人身事故であって**合理的に予見される防止可能な事故**が生じないことと定める。

(出典: 国土交通省)



- Foreseeable = 予見できる
- Preventable = 防止できる

(日本自動車工業会: 自動運転の安全性評価フレームワークVer2.0)

自動運転車の安全：合理的に予見される防止可能な人身事故が生じないこと

自動運行装置の国際基準

自動運行装置※の国際基準の概要(※高速道路における60km/h以下の車線維持機能)

国土交通省
【別紙1】

これまでの状況

- 2019年6月、国連WP29(自動車基準調和世界フォーラム)において、自動運転のフレームワークドキュメント(自動運転車の国際的なガイドラインと基準策定スケジュール等)に合意。
- 日本は、WP29傘下の専門家会議等において共同議長等の役職を担い、官民オールジャパン体制で議論をリード。
- 2020年6月に開催されたWP29本会議において成立。

対象となる自動運転のイメージ



主な要件

- 自動運転システムが作動中、乗車人員及び他の交通の安全を妨げるおそれがないことについて、**注意深く有能な運転者と同等以上のレベルであること。**
- 運転操作引継ぎの警報を発した場合において、運転者に引き継がれるまでの間は制御を継続すること。運転者に引き継がれない場合はリスク最小化制御を作動させ、車両を停止すること。
- 運転者が運転操作を引き継げる状態にあることを監視するためのドライバーモニタリングを搭載すること。
- 不正アクセス防止等のためのサイバーセキュリティ確保の方策を講じること。
- 自動運転システムのON/OFFや故障等が生じた時刻を記録する作動状態記録装置を搭載すること。
- 上記の要件について、シミュレーション試験、テストコース試験、公道試験及び書面を組合せて、適合性の確認を行うこと。
(例：他車の割り込み等が起こりうる状況において、注意深く有能な運転者の反応速度や制動力等のモデルに基づいて回避可能と考えられる衝突を、当該自動運転車が回避できることを確認。)

(国土交通省：自動運行装置の国際基準の概要)

自動運転車には、注意深く有能な運転者と同等以上の安全性が求められる

2. SAKURAプロジェクト概要

(自動走行システムの安全性評価基盤構築に向けた研究開発プロジェクト)



SAKURA

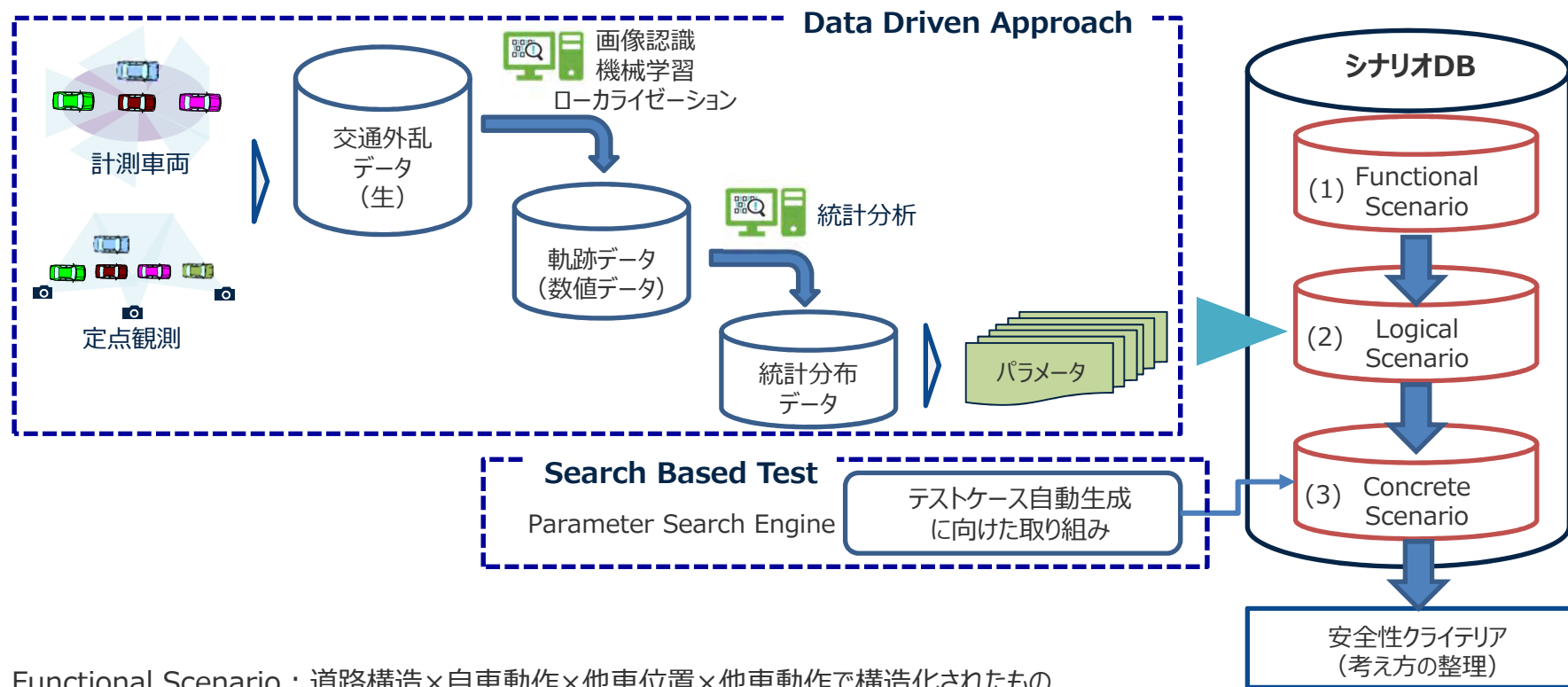
Safety Assurance KUdos for
Reliable Autonomous Vehicles

SAKURAプロジェクト概略

◆ プロジェクトの目的

国際動向をふまえて**自動運転システムの安全性を評価する手法を開発**すること

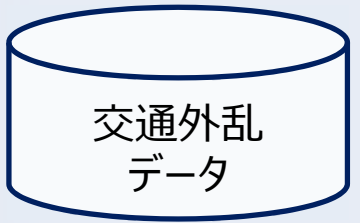
◆ 自動運転システムの安全性評価手法（キーワード：テストシナリオ）



- (1) Functional Scenario : 道路構造×自車動作×他車位置×他車動作で構造化されたもの
- (2) Logical Scenario : 観測データ分布特性から合理的に予見可能なパラメータ範囲を示したもの
- (3) Concrete Scenario : 各パラメータ値の特定の組み合わせられて安全性評価テストに活用できるもの

テストシナリオ作成に必要なプロセス

**【Step1】
実交通環境データ収集
(計測車両・定点観測)**

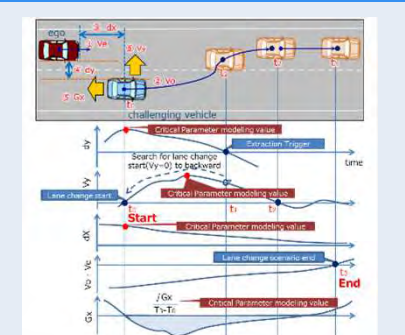


交通外乱
データ

計測・データ処理



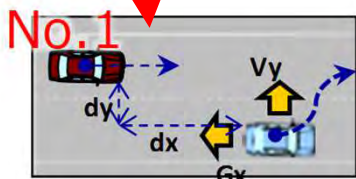
**【Step2】
交通外乱データ処理
(Functional scenario)**



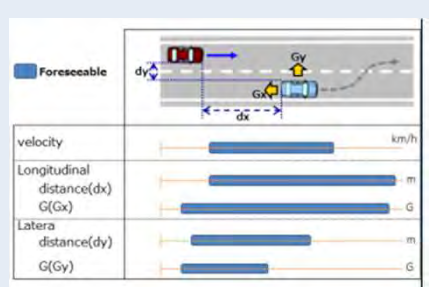
シナリオ用パラメータ定義

Road geometry	Ego-vehicle behavior	対向車	対向車	対向車	対向車(停止)
レーン幅	No.1	No.2	No.3	No.4	No.5
レーン間隔	No.6	No.7	No.8	No.9	No.10
レーン幅	No.11	No.12	No.13	No.14	No.15
レーン間隔	No.16	No.17	No.18	No.19	No.20
レーン幅	No.21	No.22	No.23	No.24	No.25
レーン間隔	No.26	No.27	No.28	No.29	No.30

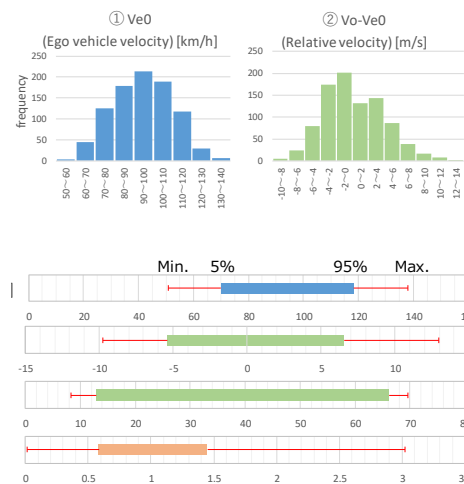
24シナリオ



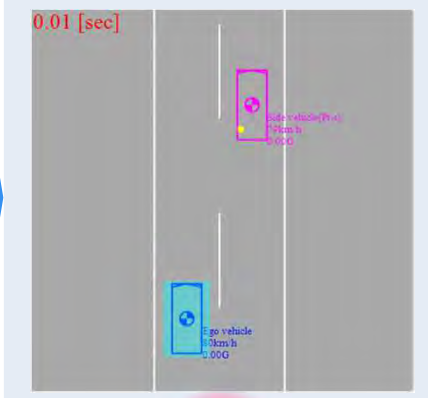
**【Step3】
パラメータ分布作成
(Logical scenario)**



分析・パラメータ範囲特定



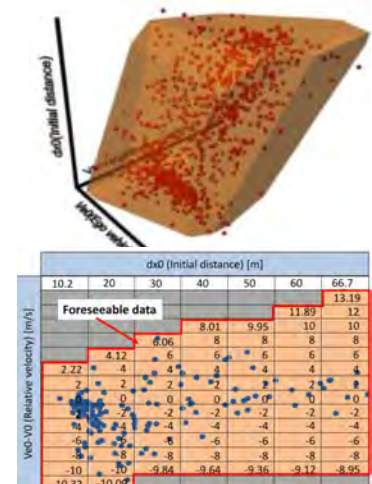
**【Step4】
テストシナリオ生成
(Concrete Scenario)**



0.01 [sec]

Ego vehicle
50km/h
0.000

シナリオ生成手法開発



計測車両による交通外乱データの解析例



3D point cloud (LiDAR)

```
id: 5
type: truck
vel: -3.35
lane: other
cut in/out: out_host_lane
cipv flag: False

id: 2
type: truck
vel: -3.50
lane: other
cut in/out: out_host_lane
cipv flag: False
```

```
id: 1
type: car
vel: 0.54
```

Front camera

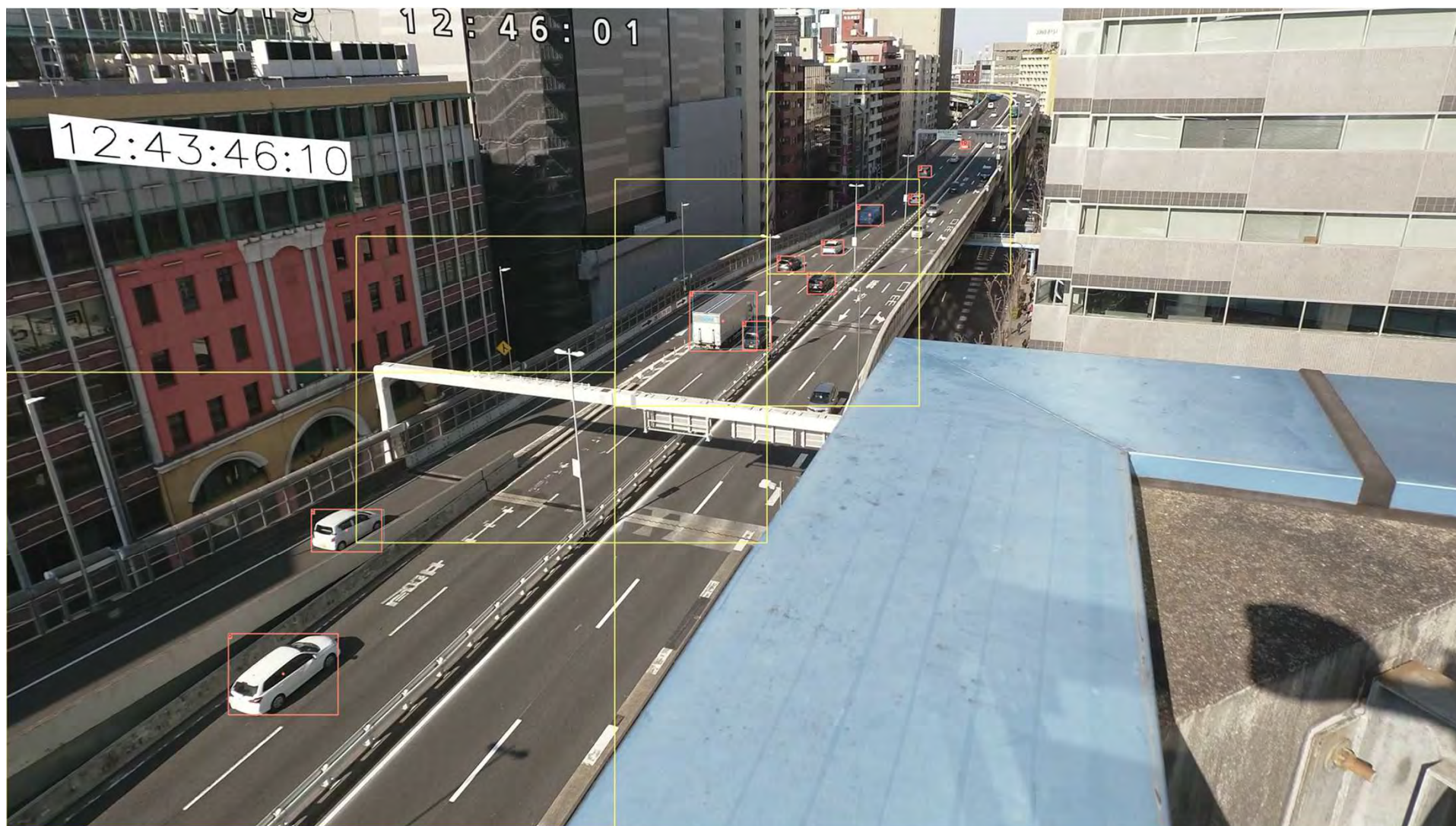


Rear camera

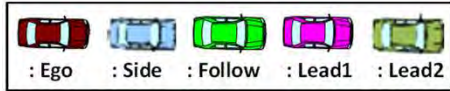


Finally we analyze the vehicle trajectories

定点観測による交通外乱データの解析例



自専道のシナリオ (24パターン)

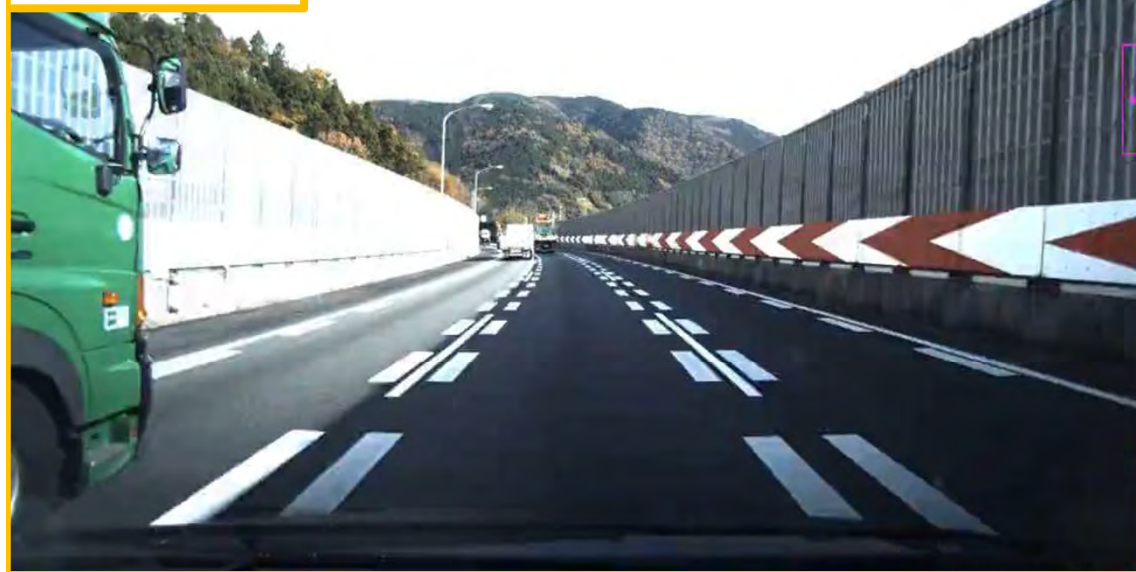


Surrounding Traffic Participants' Position and Behavior

		Road geometry	Ego-vehicle behavior	カットイン	カットアウト	加速	減速(停止)
Road Geometry and Ego-vehicle behavior	本線		レーンキープ	No.1 	No.2 	No.3 	No.4
			レーンチェンジ	No.5 	No.6 	No.7 	No.8
	合流		レーンキープ	No.9 	No.10 	No.11 	No.12
			レーンチェンジ	No.13 	No.14 	No.15 	No.16
	分岐		レーンキープ	No.17 	No.18 	No.19 	No.20
			レーンチェンジ	No.21 	No.22 	No.23 	No.24

カットイン事例1 (左レーンから他車が近づく)

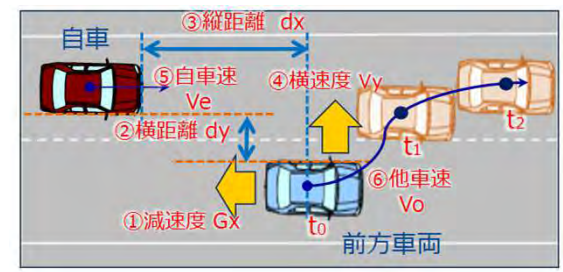
車両前方映像



車両後方映像
(ミラー)



鳥瞰図
青：自車
桃：他車



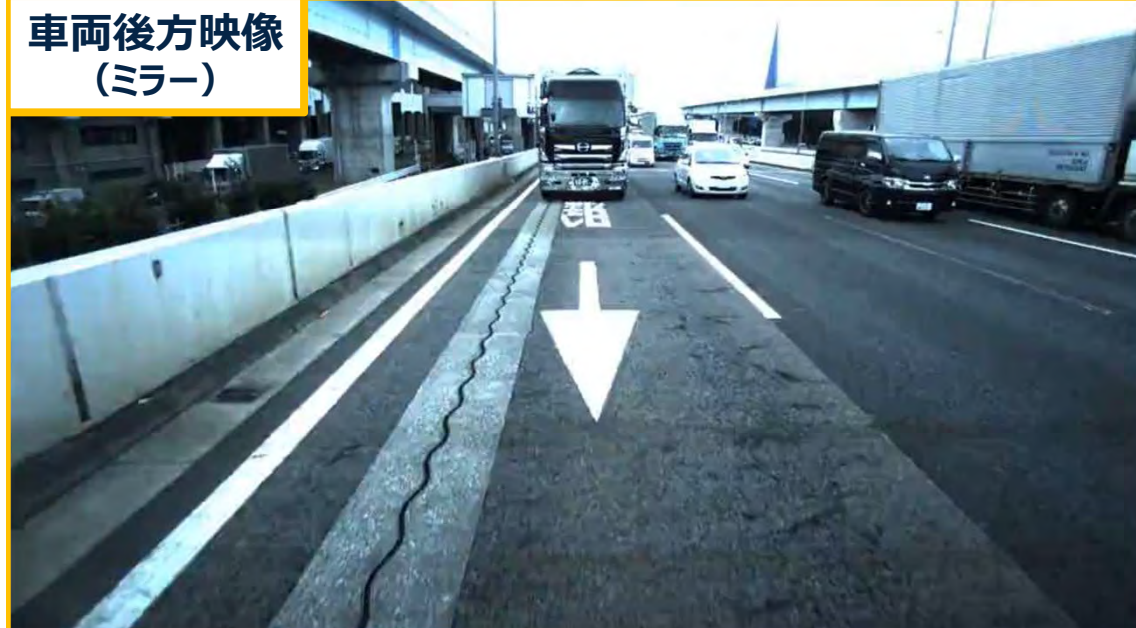
No.	パラメータ	値
①	他車減速度(前後)	[G] 0.03
②	相対位置(左右, 初期)	[m] 9.6
③	相対位置(前後, 初期)	[m] 50.1
④	他車横速度(最大)	[m/s] 4.4
⑤	自車速度(前後, 初期)	[km/h] 94.5
⑥	他車速度(前後, 初期)	[km/h] 89.9

カットイン事例2（右レーンから他車が近づく）

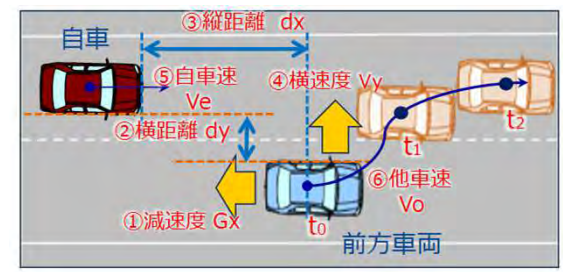
車両前方映像



車両後方映像
(ミラー)



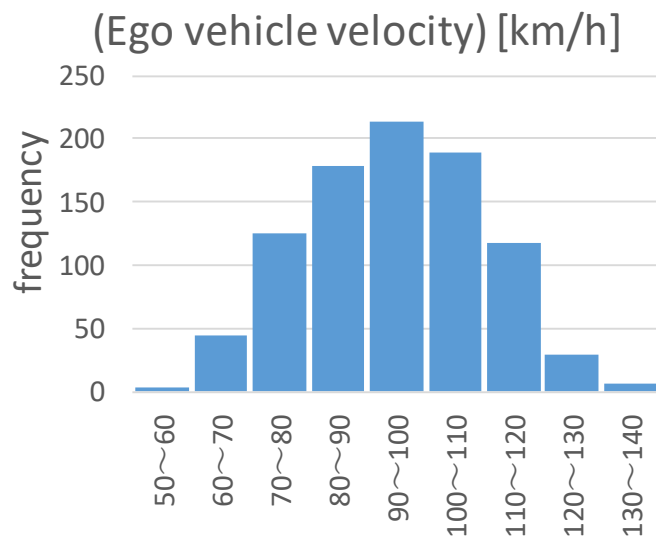
鳥瞰図
青：自車
桃：他車



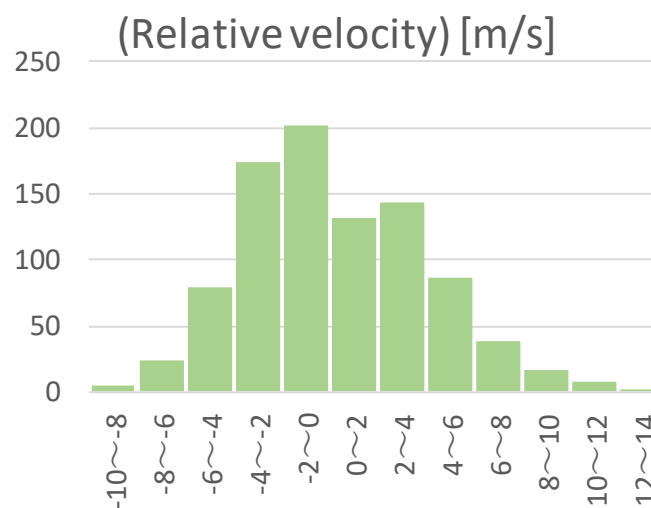
No.	パラメータ	値
①	他車減速度(前後)	[G] -0.07
②	相対位置(左右, 初期)	[m] 3.1
③	相対位置(前後, 初期)	[m] 34.0
④	他車横速度(最大)	[m/s] 1.05
⑤	自車速度(前後, 初期)	[km/h] 44.5
⑥	他車速度(前後, 初期)	[km/h] 22.4

他車カットの特徴 (データ数 : 911件)

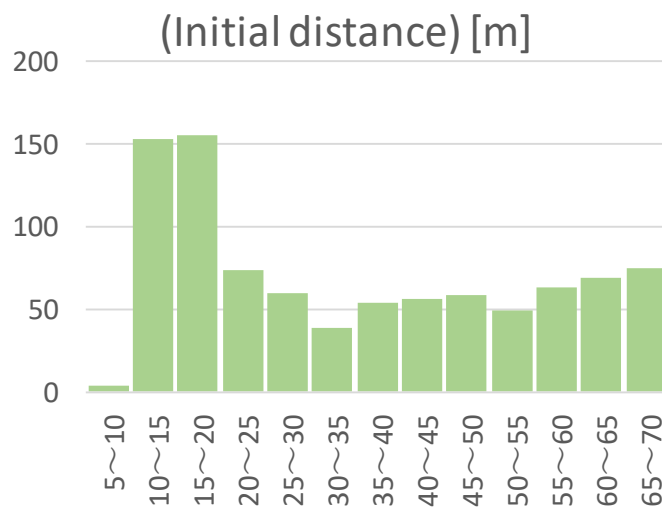
自車速度(初期)



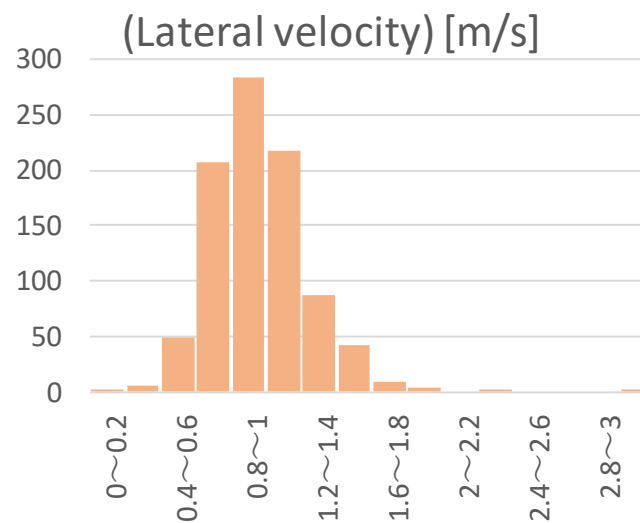
相対速度(初期)



相対位置(初期)

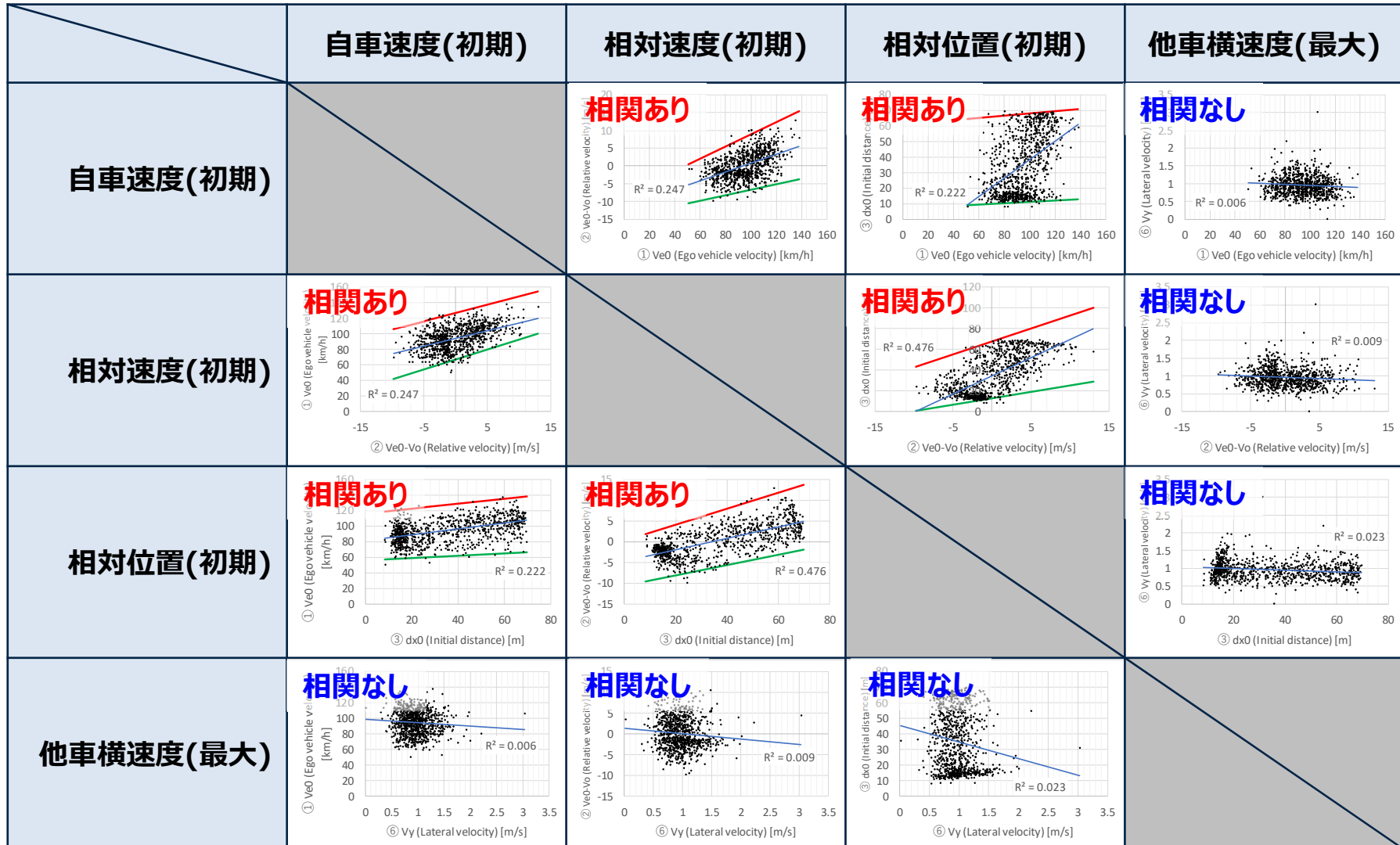


他車横速度(最大)



パラメータ間の相関関係

◆パラメータ同士の関係：自車速度・相対速度・相対位置に相関関係あり

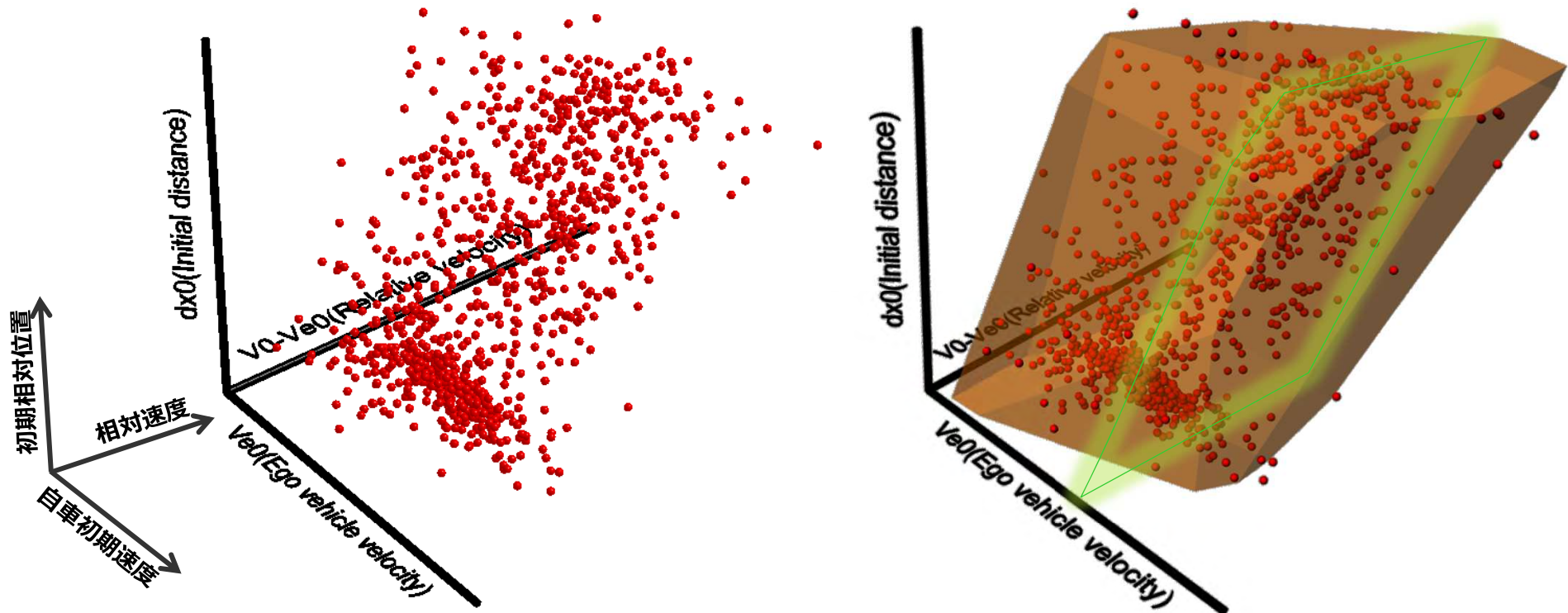


予見可能なパラメータ範囲の特定

観測されたデータ(911件)

外挿

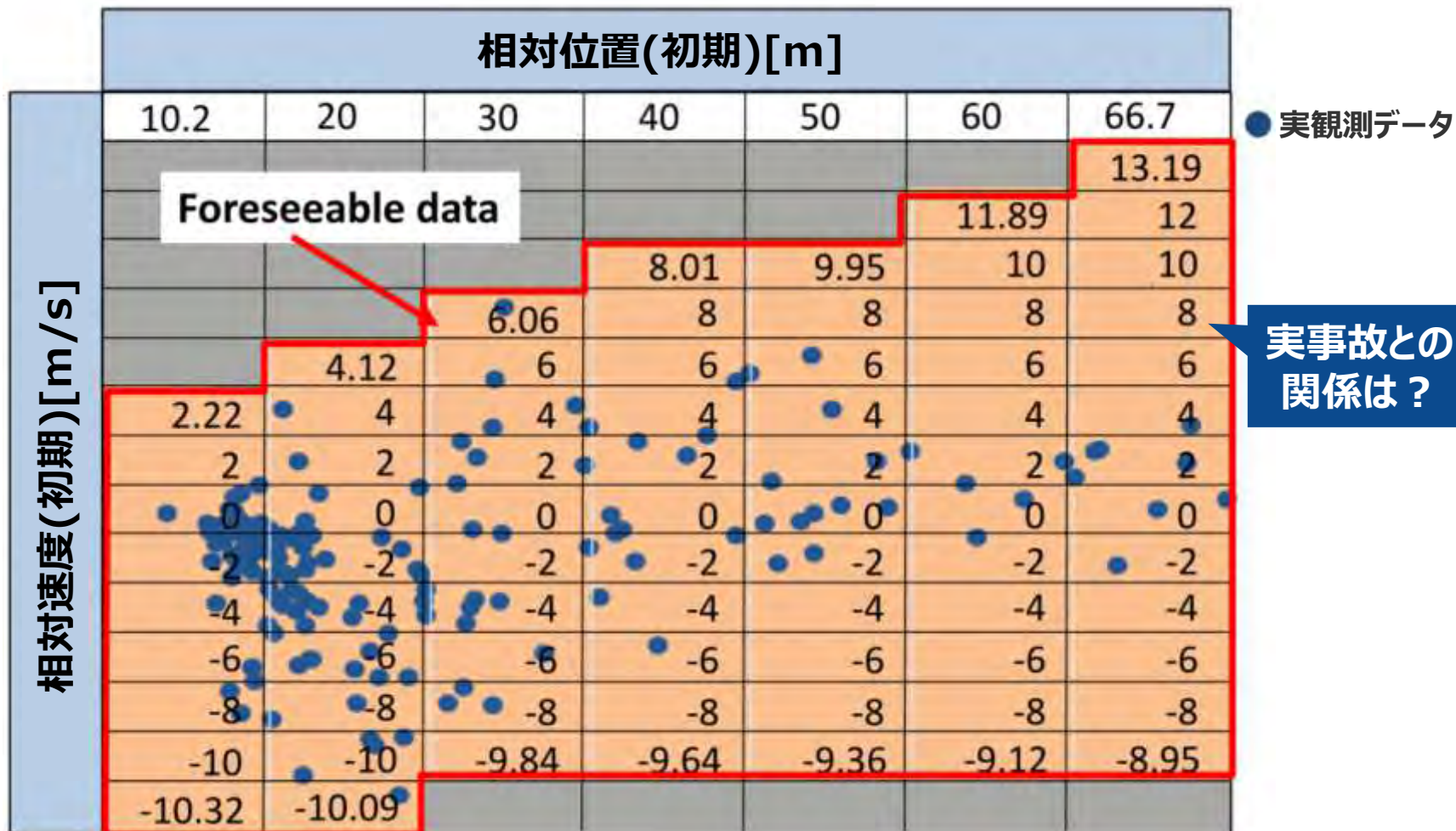
相関関係を考慮して特定した範囲



観測したパラメータ範囲・相関関係を用いて将来起こり得る範囲へ拡張

他車カットインのテストシナリオ

自車速度(初期) : 80[km/h], 他車横速度(最大) : 1.72[m/s]



拡張したテストシナリオに実際に事故が起きるような条件が含まれているのか？

他車カットイン事故事例（夜，雨天）

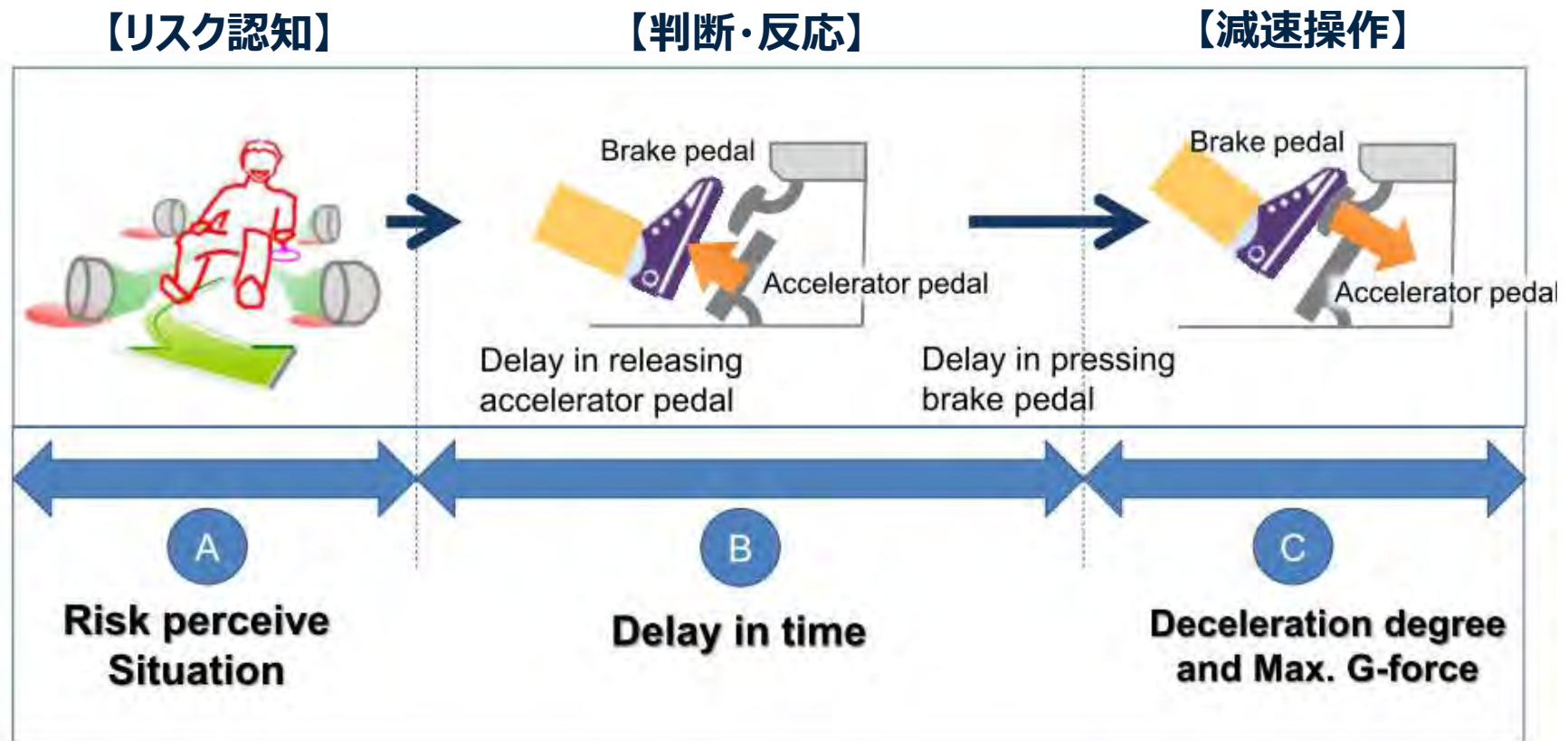


カットイン開始タイミング : 0.00s, 衝突タイミング : 2.14s

※詳細な事故調査データから推定した暫定的なカットイン条件

「注意深く有能な運転者」の考え方(1)

- ◆ 安全に運転するために運転者が行っていること

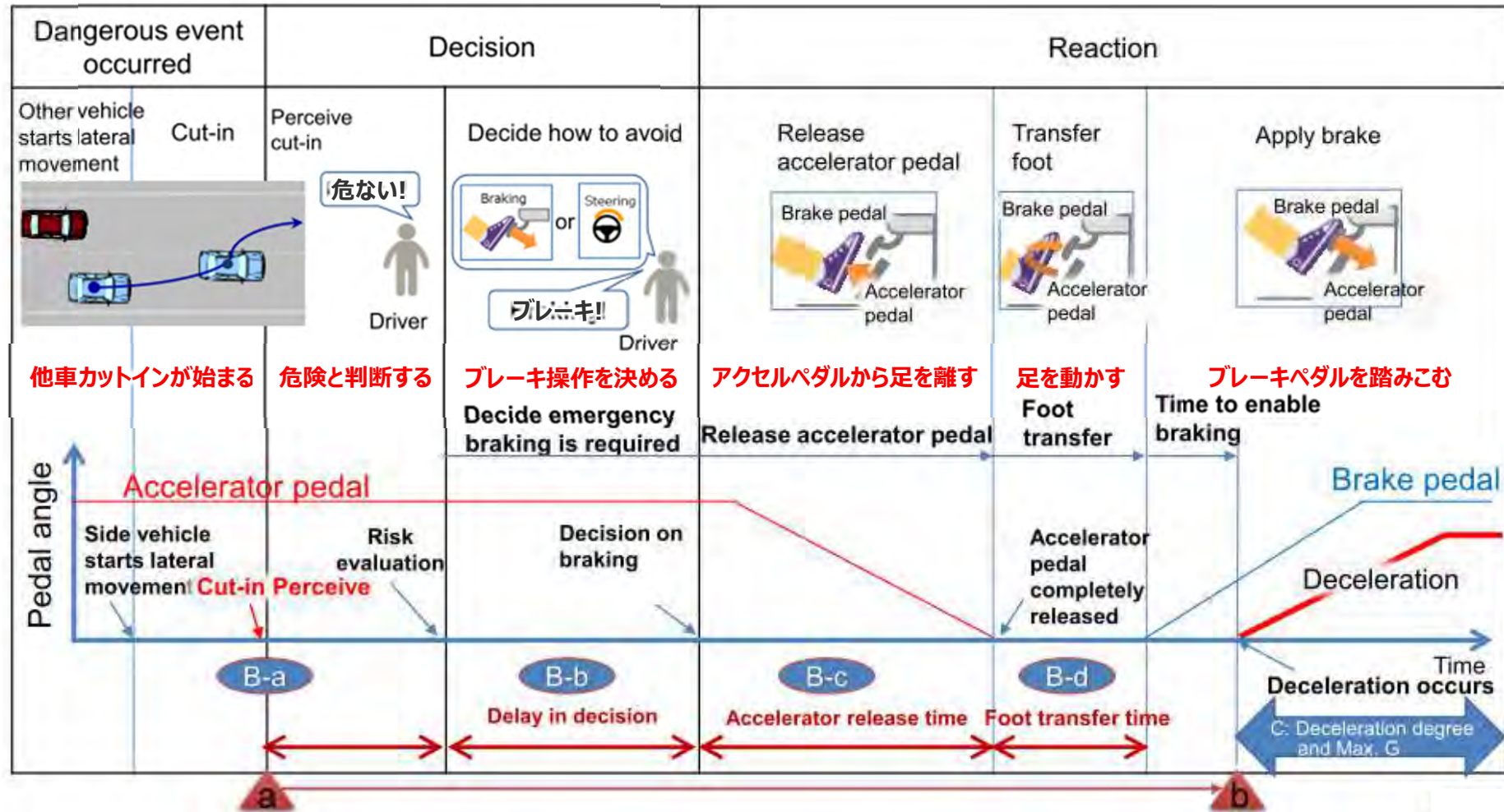


(WP29 GRVA 4th VMAD IWG: Safety Criteria Study on Innovative Safety Validation Methods of Automated Driving Systems)

運転者のブレーキによる衝突回避行動を前提とした安全基準案を検討
3つのステップ (A)リスク認知, (B)判断・反応, (C)減速操作) の構成

「注意深く有能な運転者」の考え方(2)

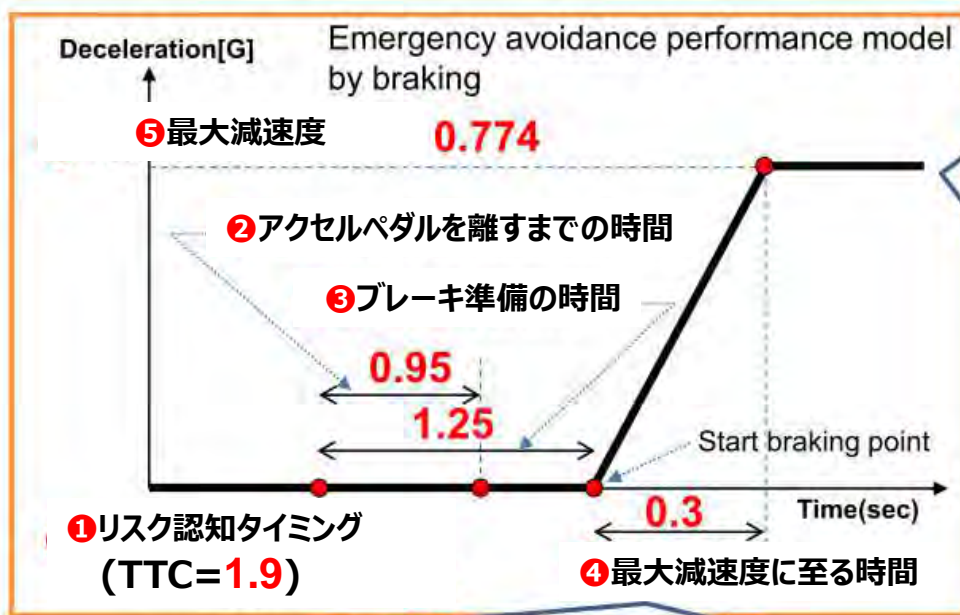
◆ 他車がカットインするシーンにおける運転者の対応の流れ



(WP29 GRVA 4th VMAD IWG: Safety Criteria Study on Innovative Safety Validation Methods of Automated Driving Systems)

衝突を避けるための運転者のブレーキ操作を細かく分解して検討

「注意深く有能な運転者」のブレーキ操作の模擬

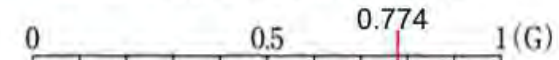


⑤ A study example of emergency braking characteristics of driving trainees in Japan

・General driver : 0.689G

・Driving trainees* : 0.774G

*Driving trainees: Trainees of Japan Safe Driving Center (JSDC) Central Training Academy for Safe Driving



Trainees

N = 245

Regular drivers

N = 36

The difference in distribution of the trainees and the regular drivers average deceleration values

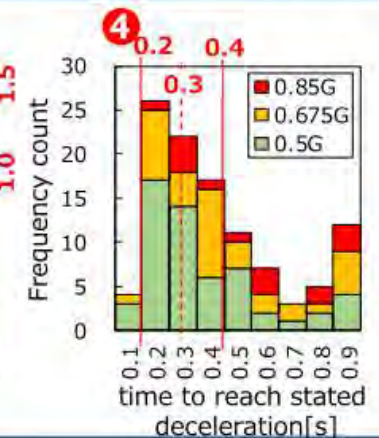
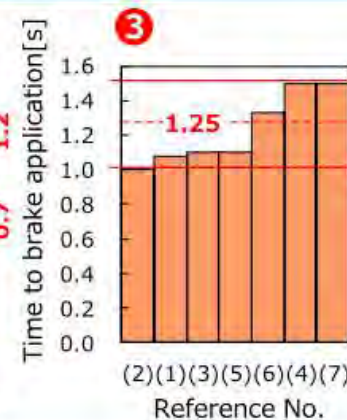
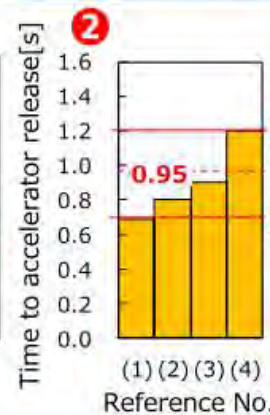
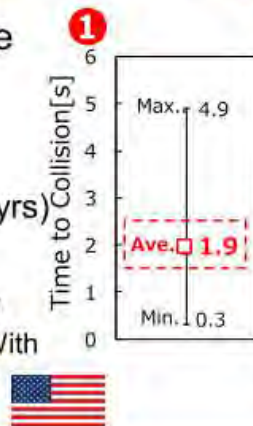
Reference: Makisita et al.(2001)

Evaluation data of attentive drivers

Evaluation subjects:

Average age (35yrs, 18-68 yrs)
66 Males and 43 Females

Reference: Development of an FCW Algorithm Evaluation Methodology With Evaluation of Three Alert Algorithms (NHTSA June2009)

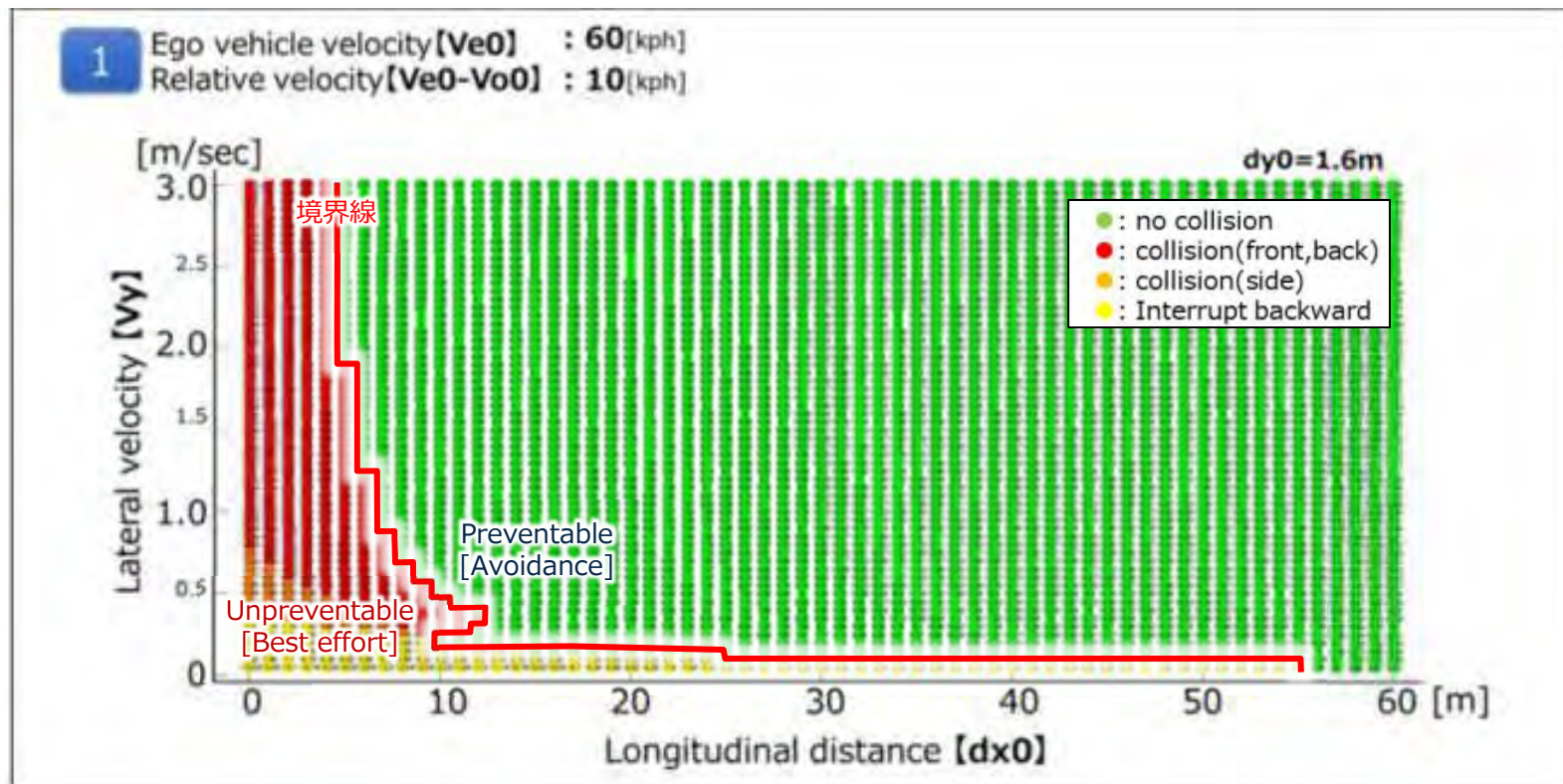


(WP29 GRVA 3rd VMAD IWG: Safety Criteria Study for New Assessment/Test Methods of Automated Driving System)

熟練者のブレーキ操作を表す値を設定し、注意深く有能な運転者を模擬

国際基準(UN-R157)のカットインシナリオ

◆ 自動運転車が具備すべき安全性評価に活用



(UNECE: Proposal for a new UN Regulation on uniform provisions concerning the approval of vehicles with regards to Automated Lane Keeping System)

合理的に予見可能かつ防止可能な境界によって安全性を評価

SAKURAシナリオデータベース

- ◆ シナリオDB：網羅的な体系と合理的に予見可能で防止可能なシナリオを収録

An introduction to Scenario Database

The SAKURA Project(Safety Assurance Kudos for Reliable Autonomous vehicles)



実交通流の実態に即したテストシナリオを出力し、評価結果をフィードバック

3. 現在の国際標準化の動向

(ISO3450Xシリーズの動向およびISO21448との関係性)

ISO3450Xの策定状況

SC33 “Vehicle dynamics and chassis components” 議長・幹事：ドイツ

WG9 “Test scenarios of automated driving systems” コンビナ：中国

ISO 文書No	文書タイトル	Scopeの概要	プロジェクトの状況	IS発行計画	リーダー (サブリーダー)
ISO34501	Terms and definitions of test scenarios for automated driving systems 【用語と定義】	ADレベル3以上の用語と定義の明確化	IS published	22年10月	中国
ISO34502	Scenario-based safety evaluation framework for Automated Driving Systems 【安全性評価シナリオの枠組み】	ADシステムの試験シナリオと評価プロセスの技術枠組みの規格化	IS published	22年11月	日本 (ドイツ)
ISO34503	Taxonomy for Operational Design Domain for an Automated Driving System 【ODDの分類】	ADシステムのODDを定義する階層分類の規格化	DIS	23年4月	イギリス (日本)
ISO34504	Scenario attributes and categorization 【シナリオの評価】	試験シナリオの属性とカテゴリ分けの定義	CD	23年10月	オランダ (ドイツ)

※ISO34505の動向は別途調査中

ISO34502の策定状況：22/11に発行

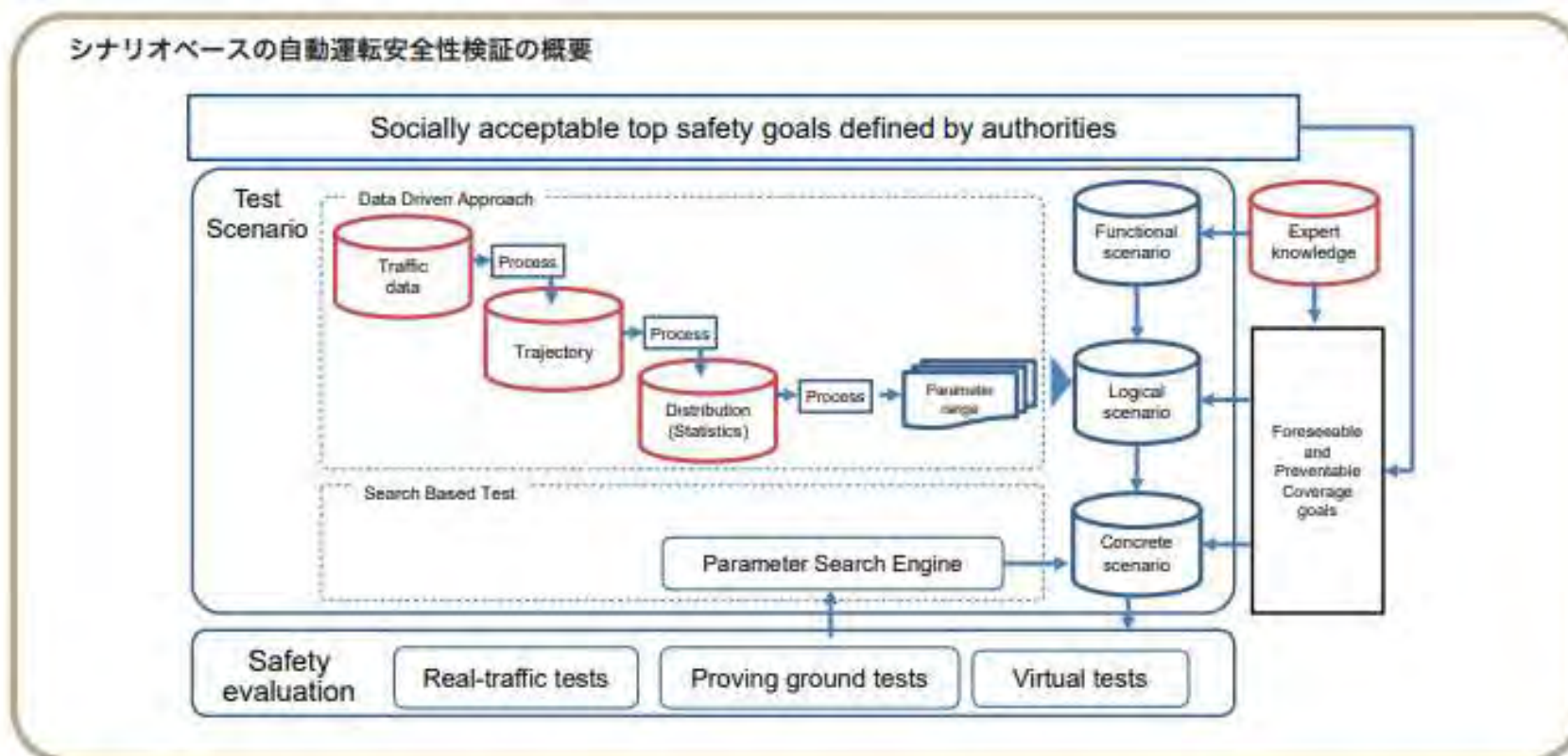
ISO 34502:2022

Road vehicles — Test scenarios for automated driving systems — Scenario based safety evaluation framework

Published
ISO 34502:2022
Stage: 60.60 v

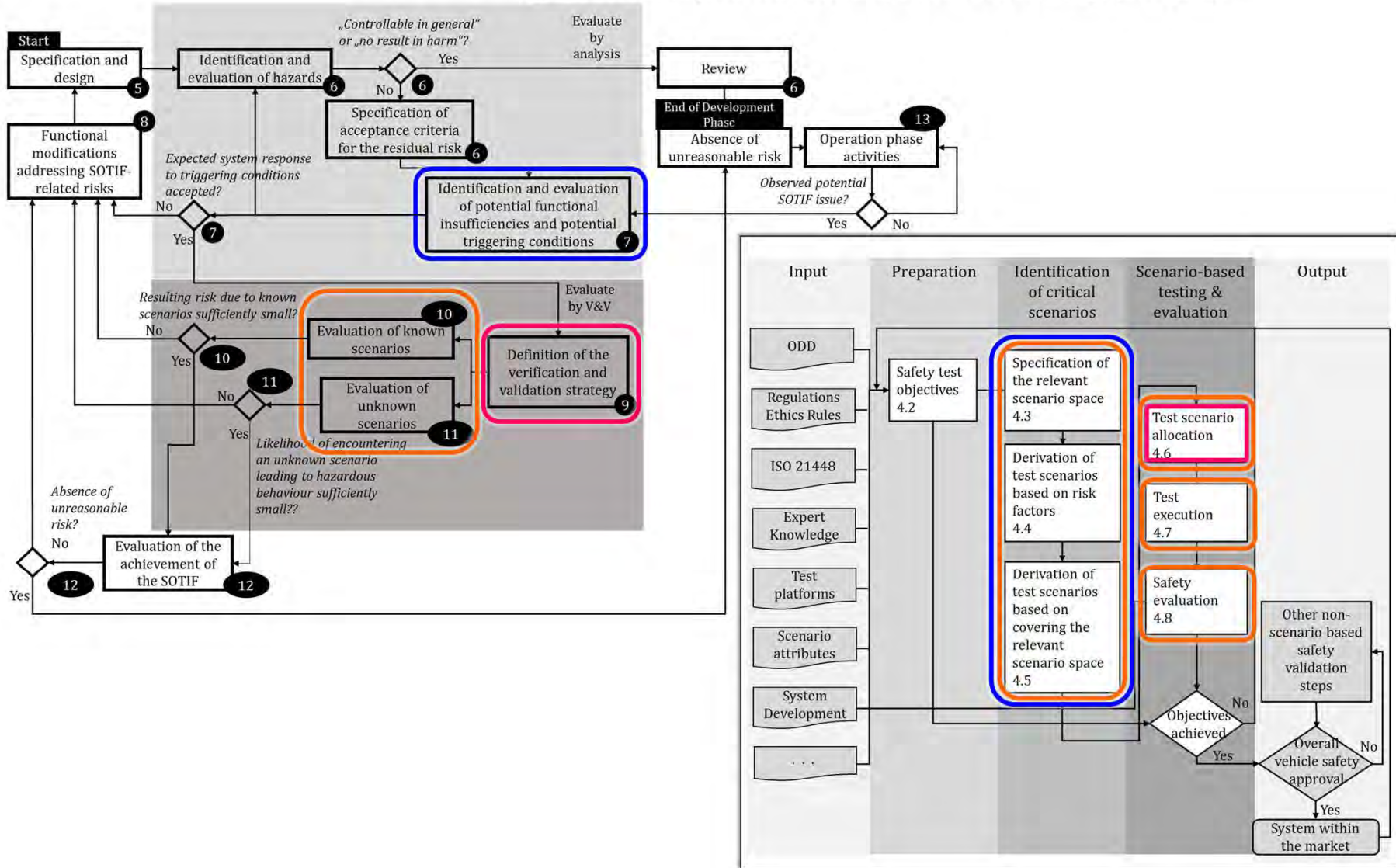
SC33/WG9(安全性検証シナリオ) 2018年～

日本は自動運転安全性の国際的な議論をリード



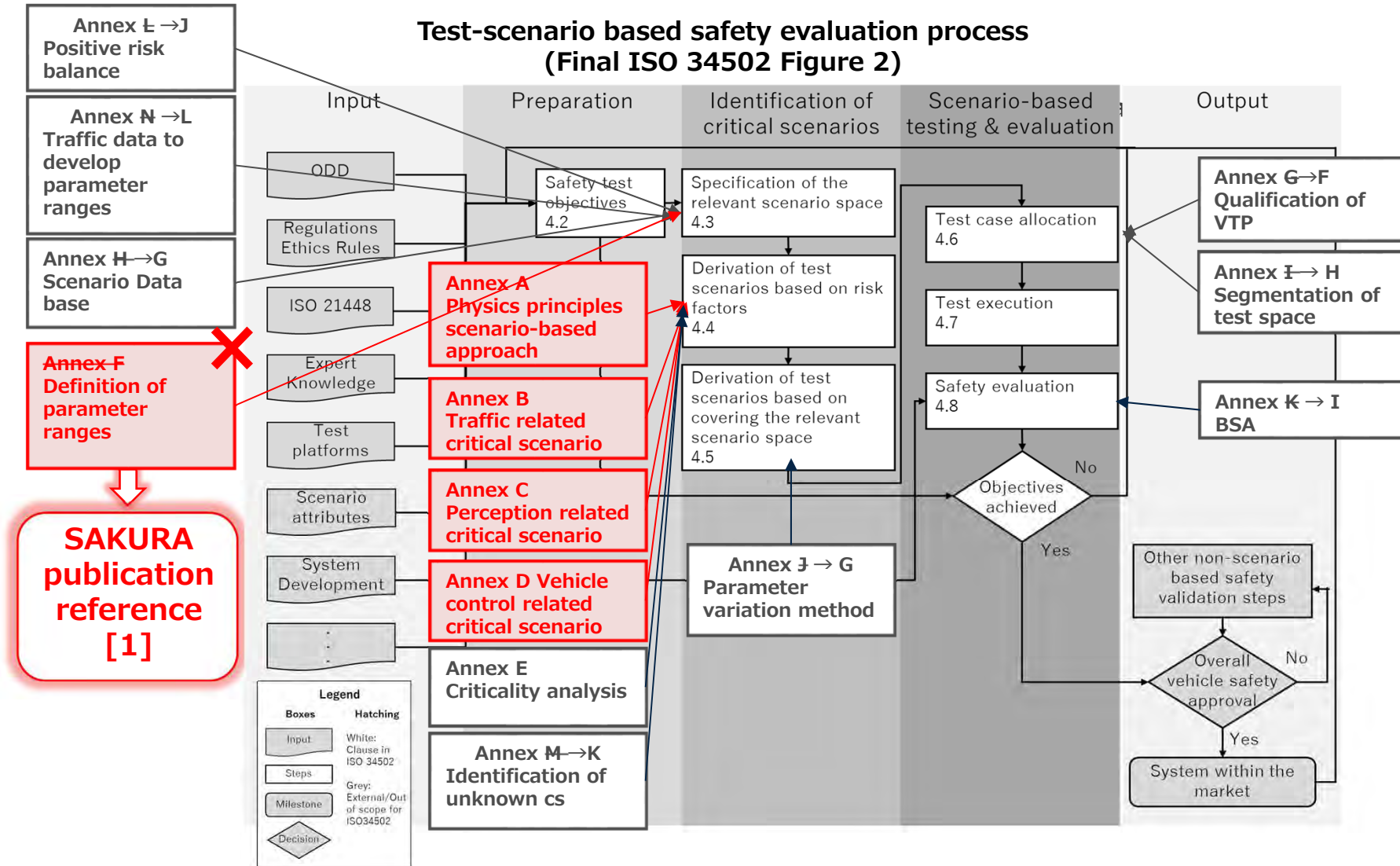
ISO21448とISO34502の関係性

Figure 3. Relationship between ISO 21448 (left) and ISO 34502 (right) flow charts.



ISO21448(SOTIF)とISO34502は相互に参照する関係

ISO34502とSAKURA成果の関係



[1] THAL, S. et al. Incorporating safety relevance and realistic parameter combinations in test-case generation for automated driving safety assessment. In 2020 IEEE 23rd International Conference on Intelligent Transportation Systems (ITSC). IEEE, 2020, p. 1-6.

国際連携・協調に向けた活動の実施



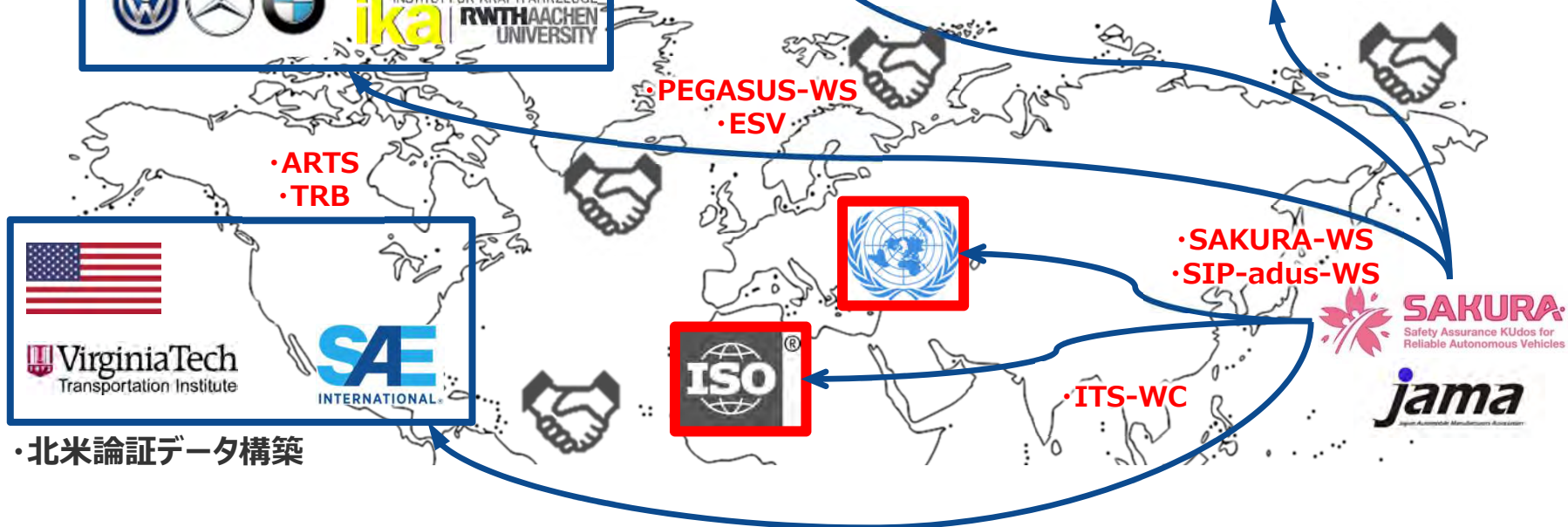
・シナリオ・論証体系協調



・欧州内の調和動向把握



・シナリオDB協調



・北米論証データ構築

さまざまな国際学会/会議, bilateral会議/WSなどにより連携・協調を推進

4. まとめと今後の取組み

まとめ

➤ 自動運転車に求められる安全性とは

- ・運行設計領域において合理的に予見可能で防止可能な事故が起きないこと
- ・合理的に予見可能な範囲と防止可能な範囲を定められる手法が必要



◆ 合理的に予見可能な範囲を定めること

- ・実交通環境データの収集・分析に基づいて将来起こり得る範囲を推測し、自動運転車の対応力を試すテストシナリオを用意

◆ 防止可能な範囲を定めること

- ・注意深く有能な運転者によるブレーキ操作と比べることにより、自動運転車の対応力の安全性を判断する基準案を用意

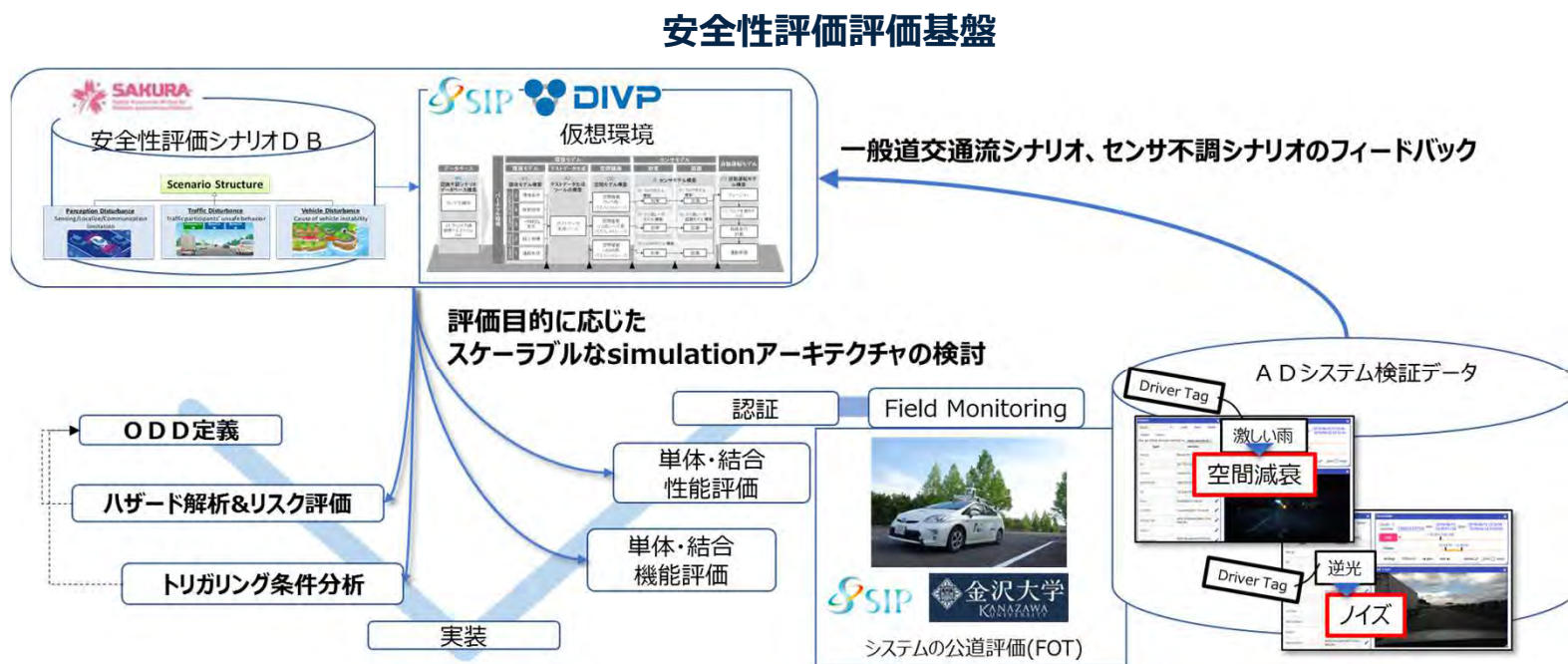


- ・自専道×本線渋滞×車線維持の自動運行装置の国際基準に反映された
- ・機能拡大や一般道へ対応するシナリオ・評価基準を引き続き作成する

今後の取組み（2022年度～）

➤ 自動運転の安全性評価基盤構築の検討(SIP自動運転と連携)

- ・DIVP(Driving Intelligence Validation Platform), 自動運転技術(L3/L4)に必要な認識技術等に関する研究(AD-URBAN)と連携



(安全性評価基盤検討合同ワークショップ：自動運転安全性評価合同推進TFの概要)

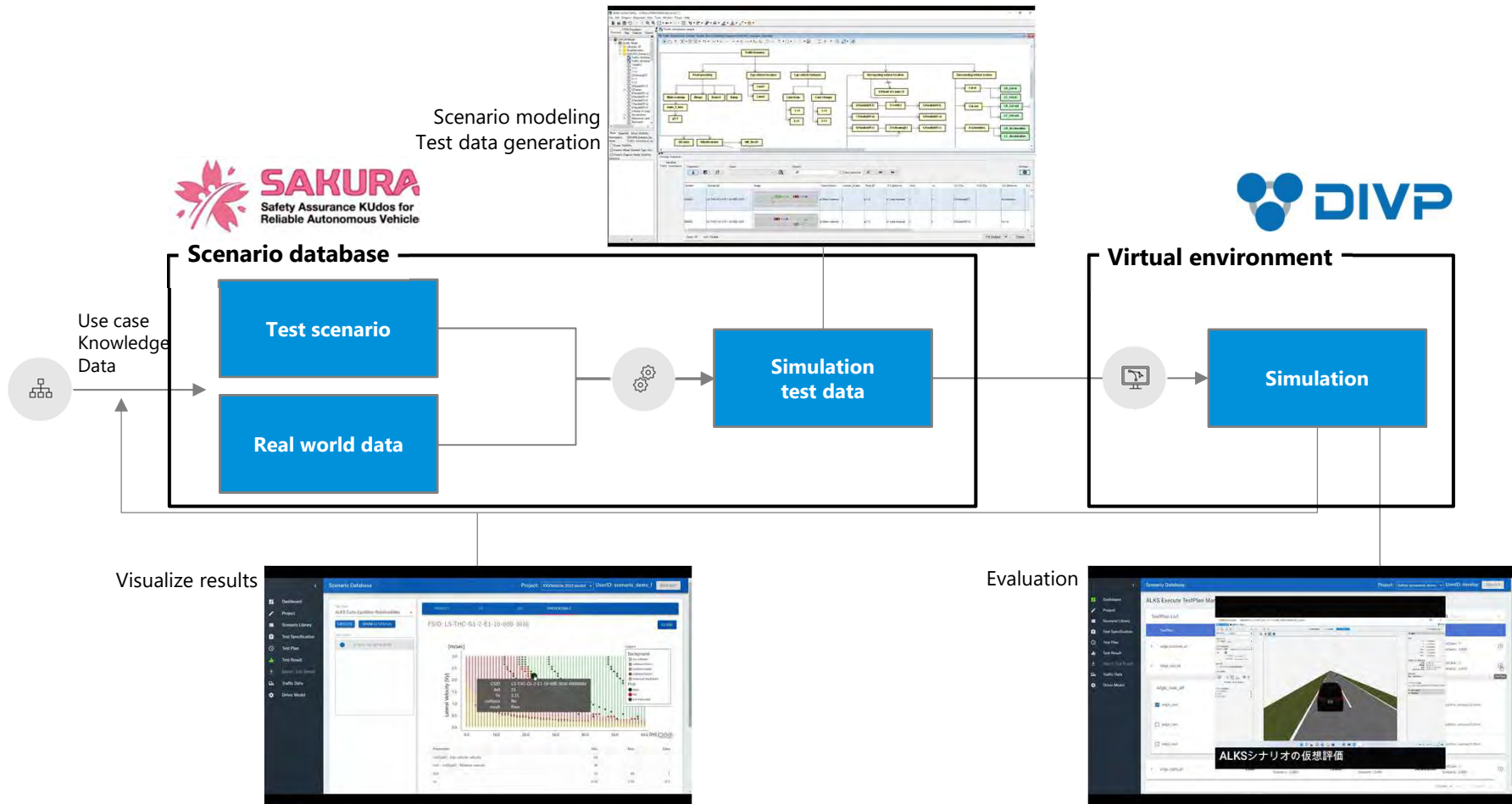
➤ 一般道への安全性評価手法の拡張

- ・一般道のシナリオ体系の開発，交差点評価などについて取組みを推進中

国内の関連プロジェクトと連携して安全性評価基盤/手法を開発中

【参考】安全性評価基盤の現状

◆ 安全性評価評価基盤：SAKURAシナリオDBとDIVP仮想評価環境が結合



(S. Taniguchi: A linked scenario database and virtual environment to enhance automated driving safety and development speed)

網羅的な体系に基づいて生成されるシナリオが循環する評価基盤を構築中

ご静聴ありがとうございました



<https://www.sakura-prj.go.jp/>



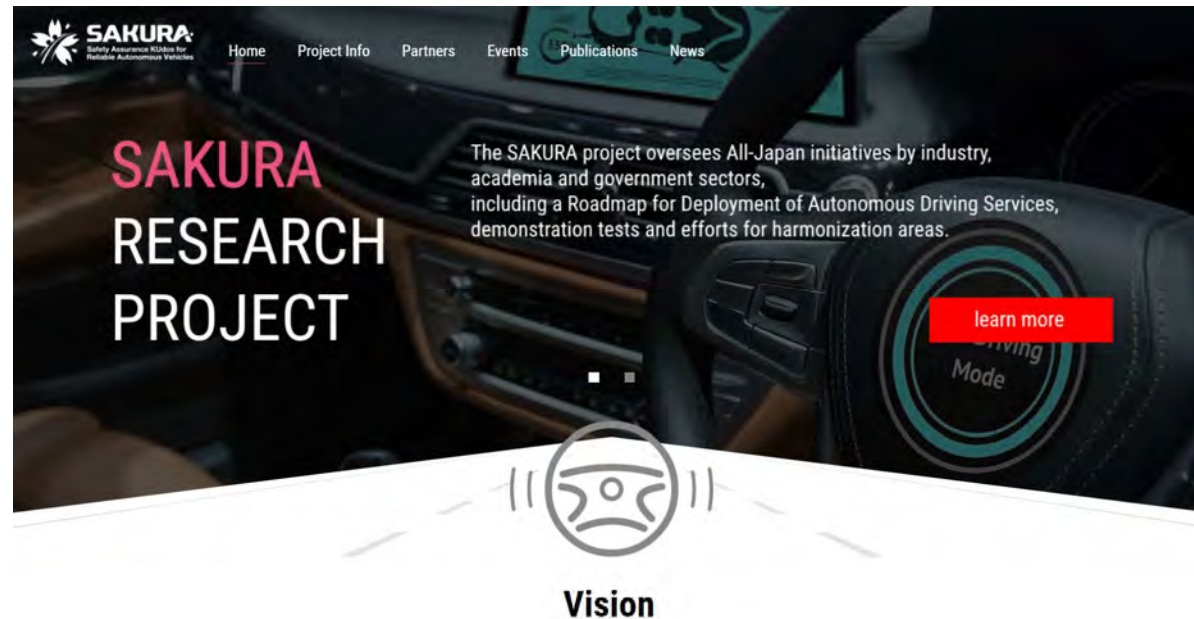
HARI



本講演は、経済産業省「無人自動運転等のCASE対応に向けた実証・支援事業（自動走行システムの安全性評価基盤構築に向けた研究開発プロジェクト）」成果の一部をまとめたものであり、関係各位に対してここに謝意を表します。

【参考】SAKURA project ウェブサイト

プロジェクト概略・対外的な活動を適宜公開 (<https://www.sakura-prj.go.jp/>)



Solving social issues by promoting the implementation of automated driving in society

With recent CASE progresses, the widespread use of automated driving is expected to resolve social issues such as carbon neutrality and road traffic safety.

Meanwhile, in SAE level 3 and above automated driving, the safety and evaluation method differs from previous approaches because the system operates the vehicle instead of the driver.

Here, the SAKURA Project collects evidence for safety arguments by gathering and analyzing various data and collaborating with other countries to create new safety evaluation methods.

Also, developing a database for safety assessment/test scenarios (Highway & Urban) and studying their practical application through all-Japan industry-government-academia collaboration while contributing to accelerating the development of automated driving technology within Japan.

